

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

з курсу

«ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА»

(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом
підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
спеціальності «Світлотехніка і джерела світла»)



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Фізичні основи джерел світла» (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Світлотехніка і джерела світла») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Л. А. Назаренко, Є. В. Шепілко, Г. О. Петченко. – Х.: ХНАМГ, 2008. – 38 с.

Укладачі: д.т.н., проф. Л. А. Назаренко,
к.фіз.-мат.н., доц. Є. В. Шепілко,
к.фіз.-мат.н., доц. Г. О. Петченко

Рецензент: д.т.н., проф. В. К. Копил

Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла,
протокол № 9 від 10.03.2008 р.

Вступ

Методичні вказівки містять опис лабораторних робіт з курсу “Фізичні основи джерел світла” для студентів 3 курсу денної та заочної форм навчання спеціальності 6.090.600 “Світлотехніка і джерела світла” і необхідні для ознайомлення студентів з деякими експериментальними методами досліджень при вивченні фізичних основ джерел світла, а також для ознайомлення з завданням та порядком виконання необхідних експериментальних досліджень у лабораторних умовах.

Описи лабораторних робіт містять лише короткі теоретичні відомості, що необхідні для загального розуміння напрямку експериментальних досліджень, а тому для їх успішного виконання студенту необхідно попередньо вивчити відповідний теоретичний матеріал та опис електричних схем з підручників для самостійної підготовки, ознайомитися з вимірювальним обладнанням лабораторних стендів, усвідомити фізичні закономірності, що лежать в основі робіт, які виконуються. Контрольні запитання і список літературних джерел для самостійної підготовки наводяться в кінці кожного з описів лабораторних робіт.

Після завершення лабораторної роботи кожний студент має підготувати звіт-протокол про її виконання. У звіті-протоколі вказуються прізвище виконавця, дата виконання і назва лабораторної роботи, наводяться схеми вимірів, таблиці отриманих результатів з вказівкою розмірності виміряних величин, розрахункові формули, побудовані необхідні графічні залежності, остаточні результати розрахунків і висновки, а також вказуються використані у роботі вимірювальні прилади з вказівкою їх класу точності.

Побудову графіків здійснюють на міліметровому папері, а осцилограм – на кальці, після чого їх вклеюють у звіт-протокол. Протокол, що подається студентом, повинен містити:

1. Дату проведення експерименту;
2. Завдання по роботі;
3. Опис і креслення застосованої апаратури і схеми вимірювань;
4. Таблиці і графіки результатів вимірювань;
5. Висновки за отриманими результатами.

Остаточні результати треба привести в одиницях СІ з урахуванням можливих похибок.

Студент допускається до виконання роботи після співбесіди з викладачем, якому він повинен назвати мету роботи, які залежності будуть досліджуватися і порядок виконання роботи.

У кінці методичних вказівок наводиться список додаткової літератури до всього практикуму, а також додаток І, де наведені фізичні сталі та довідникові матеріали, що необхідні для розрахунків.

Лабораторна робота № I

ЗНАХОДЖЕННЯ КОНСТАНТ РІВНЯННЯ СТРУМУ

ТЕРМОЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ МЕТАЛІВ

Мета роботи - дослідження термоелектронної емісії металів, знаходження констант рівняння Річардсона - Дешмана.

За своєю будовою метали складаються з дуже великого числа атомів, розташованих близько один до одного. Валентні електрони кожного атома в металі є також “загальними” для всіх його атомів. Через те, що вони не “прив’язані” до окремо взятих атомів і легко переміщуються від одного атома до іншого, їх називають ще квазівільними або електронним газом.

Оскільки кожному атому відповідає не менш ніж один такий квазівільний електрон, концентрація останніх у металі дуже висока. Наприклад, атом вольфраму має два валентних електрона ($N_e = 2$). Його атомна вага $\mu_w = 184$, густина $\gamma_w = 19,3 \text{ Г/см}^3$. Тоді число квазівільних електронів у 1 см^3 вольфраму, тобто їх концентрацію n , можна визначити за формулою:

$$n = \frac{N_A \cdot \gamma_w \cdot N_e}{\mu_w} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,3 \cdot 2}{184} = 1,26 \cdot 10^{23} \text{ електрон/см}^3, \quad (1.1)$$

де N_A - число Авогадро.

Таким чином, концентрація електронів у металі в 5000 разів більша ніж молекулярна концентрація повітря за нормальних умов ($2,7 \cdot 10^{19}$ молекул / см^3).

Для опису руху молекул газу застосовується класична статистика Максвелла - Больцмана, але для опису поведінки електронів у металах вона є непридатною через велику концентрацію електронного газу, при якій проявляються квантові властивості електрона і спектр його енергій стає дискретним.

Для визначення енергетичного стану електронів у металах з урахуванням квантових властивостей електрона і високої концентрації застосовують квантову статистику Фермі - Дірака – Зоммерфельда (ФДЗ):

$$\frac{dn}{d\varepsilon} = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{e^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}} + 1}, \quad (1.2)$$

де ε - енергія електрона; h - стала Планка; m - маса електрона; ε_F - енергія Фермі; k - стала Больцмана; T - температура металу.

Вид розподілу електронів у вольфрамі за енергією у відповідності до статистики ФДЗ показаний на рис.1.

З формули (1.2) випливає, що в разі, коли електрон має енергію $\epsilon \leq \epsilon_F$, то при температурі $T = 0 \text{ K}$ залежність $dn/d\epsilon = f(\epsilon)$ є параболічною, тобто число електронів з енергіями від ϵ до $\epsilon + d\epsilon$ зростає і набуває максимального значення при $\epsilon = \epsilon_F$. Електронів з енергією $\epsilon > \epsilon_F$ немає, якщо

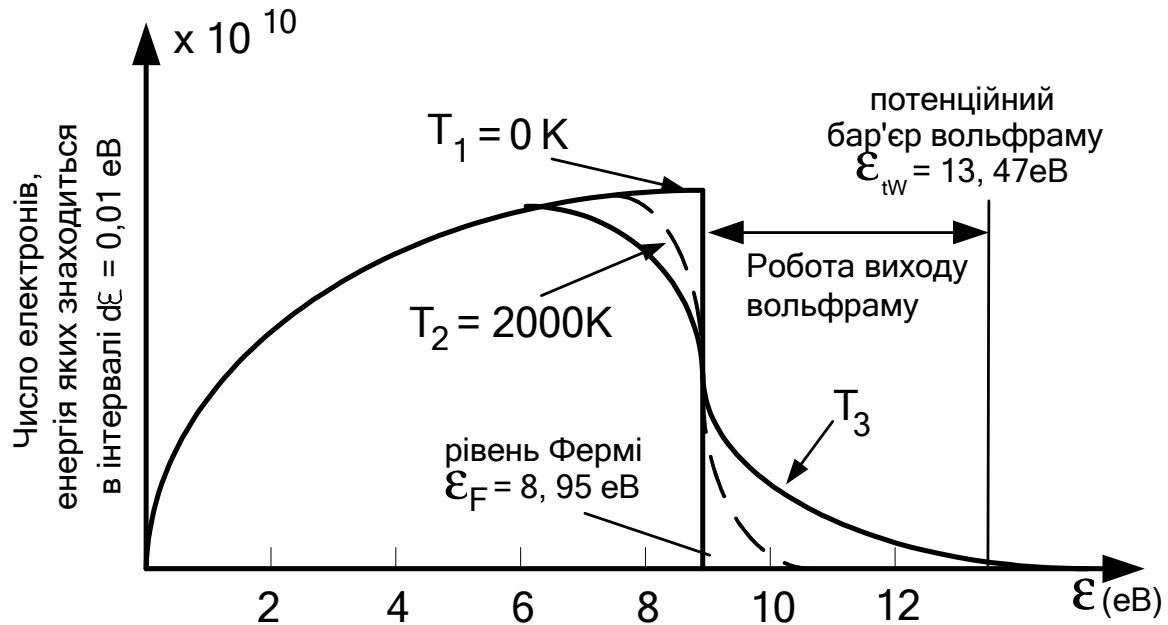


Рис.1.1.

$T = 0 \text{ K}$. У цьому випадку $dn/d\epsilon = 0$. Найбільший енергетичний рівень, який може бути заповнений електронами в металі при абсолютному нулі температури, має назву енергетичного рівня Фермі (ϵ_F) або енергії Фермі електрона.

Якщо електронам у металі якимось чином надати додаткову енергію (наприклад, нагріванням до T_2), то певна частина високоенергетичних електронів зможе зміститися на енергетичний рівень $\epsilon > \epsilon_F$ більш високий, ніж рівень Фермі (частина кривої 2 на рис.1.1). Однак і в цьому випадку електрони будуть ще належати металу. Для того, щоб залишити метал або, інакше кажучи, отримати енергію першого емісійного рівня, електрон має подолати певний потенційний (енергетичний) бар'єр, тобто виконати роботу на розірвання зв'язків з атомною ґраткою металу і виходу з металу. Кожний метал характеризується як своїм енергетичним рівнем Фермі, так і власною енергією потенційного бар'єра ϵ_t .

Наприклад, для вольфраму $\epsilon_t = 13,47 \text{ eV}$, а $\epsilon_F = 8,95 \text{ eV}$; для молібдену $\epsilon_t = 13,70 \text{ eV}$, а $\epsilon_F = 9,27 \text{ eV}$.

Якщо нагріти метал до температури T_3 ($T_3 > T_2$), то маленька частина електронів зможе залишити метал (рис. 1.1), тому що отриманої ними енергії вистачить на роботу подолання потенційного бар'єра. Перехід електрона з рівня Фермі на рівень потенційного бар'єра називається емісією електронів (**emissio**-перекладається з латини як випускання, випромінювання). У цьому випадку електрон залишає метал. Робота, яку необхідно виконати для перевodu електрона

з рівня Фермі на рівень потенційного бар'єра, називається ефективною роботою виходу і визначається як

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_t - \varepsilon_F. \quad (1.3)$$

Тверді тіла можуть випромінювати електрони з різних причин. Явище випромінювання електронів з поверхні металу під дією нагрівання називається **термоелектронною емісією**.

Використовуючи статистику ФДЗ Річардсоном і Дешманом було отримано рівняння для густини струму емісії електронів з нагрітих металів:

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}, \quad (1.4)$$

де j_e - густина струму насичення, тобто найбільшого струму емісії з одиниці поверхні металу при температурі T . Константи A та ε_0 називаються сталими термоелектронної емісії і їх можна визначити експериментально.

Якщо площу поверхні нагрітого металу позначити через S , то повний струм насичення, що може емітувати метал буде,

$$I_{\text{нас}} = S \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}. \quad (1.5)$$

Існує декілька методів визначення сталих термоелектронної емісії.

МЕТОД ПРЯМОЇ РІЧАРДСОНА

Поділимо рівняння (1.4) на T^2 , а потім прологарифмуємо:

$$\ln \frac{j_e}{T^2} = \ln A - \frac{\varepsilon_0}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (1.6)$$

З рівняння (1.6) видно, що залежність $\ln(\frac{j_e}{T^2}) = f(\frac{1}{T})$ має вигляд прямої

($y = ax+b$), показаної на рис.1.2.

Відрізок, що відтинається прямою на осі ординат, дорівнює $\ln A$, а кут нахилу – $\text{tg } \alpha = \varepsilon_0/k$.

Таким чином, за допомогою метода прямої Річардсона можна визначити як термоемісійну константу A , так і роботу виходу ε_0 . Для цього необхідно експериментально визначити густину струму емісії при різних температурах нагрівання досліджуваного металу і побудувати графічну залежність

$\ln(\frac{j_e}{T^2}) = f(\frac{1}{T})$. Незважаючи на свою простоту, метод прямої Річардсона має

ряд недоліків, пов'язаних як з неточністю визначення температури металу, так і неточністю вимірювання густини струму емісії.

Будемо нагрівати метал пропускаючи через нього електричний струм і знайдемо температуру нагрівання використовуючи залежність електричного опору металу від температури:

$$R_t = R_0(1 + \beta \cdot t^\circ), \quad (1.7)$$

де R_t і R_0 - опір при температурі $t^\circ\text{C}$ та 0°C , відповідно; β - температурний коефіцієнт опору.

Недоліком цього способу визначення температури емісії нагрітого металу є залежність коефіцієнта β від температури, окрім того, температура металу буде різною уздовж його поверхні: біля утримувачів (електричних уводів) вона нижча, ніж між ними, в результаті теплопроводу. Наявність температурних градієнтів призводить до неточності визначення температури емісії внаслідок збільшення похибки використаної величини β .

Для дослідження термоелектронної емісії в роботі використовують двоелектродну лампу, яка називається діодом. Нитка розжарювання використовується у якості металу, що випромінює електрони, так і як катод. Другий електрод - анод (рис.1.3), залежно від знаку прикладеного до нього потенціалу може притягувати чи відштовхувати електрони, що емітуються катодом.

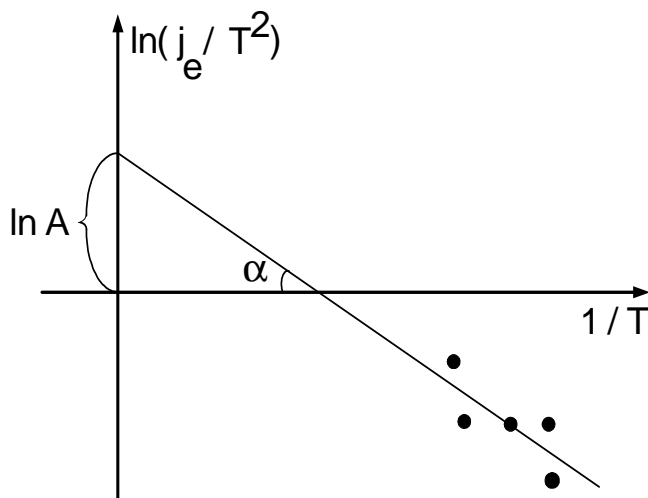


Рис.1.2.

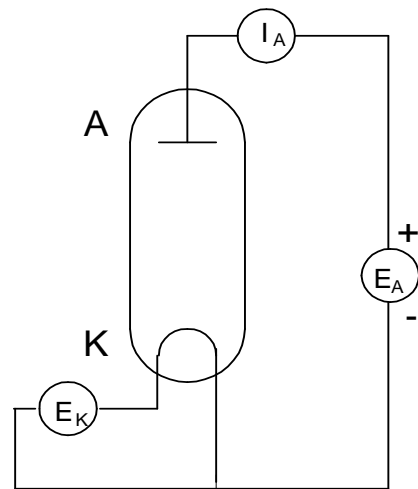


Рис.1.3.

Коли потенціал анода дорівнюватиме нулю, анодний струм досягне струму насичення, тобто струму, при якому всі електрони, що випромінюються розжареним катодом, надходять до анода:

$$I_{\text{нас}} = S \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-e\phi_0}{kT}}, \quad (1.8)$$

де $e\phi_0 = \epsilon_0$; ϕ_0 - потенціал виходу електрона з металу.

Якщо прикладений до анода потенціал буде гальмуючим, тобто "–" до аноду і "+" до катоду, то анодний струм можна виразити формулою

$$I_a = I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{-e(U_a)}{kT}}. \quad (1.9)$$

Якщо катод і анод виготовлені з різних металів, то в проміжку анод - катод діятиме контактна різниця потенціалів $U_{\text{к.р.}}$, яка буде гальмувати рух емітованих електронів і її треба додати до потенціалу анода. Тоді

$$I_a = I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{-e(U_a + U_{\text{к.р.}})}{kT}}. \quad (1.10)$$

Залежність анодного струму від потенціалу анода називають вольт – амперною характеристикою (ВАХ) діода (рис.1.4). Можна бачити на рис.1.4, що ВАХ до точки С має вигляд експоненти: на ділянці АВ струм зі зменшенням **від’ємного** потенціалу анода зростає і продовжує зростати зі збільшенням **додатного** потенціалу на ділянці ВС. Поблизу точки С рівень зростання струму зменшується, тому що всі електрони, які випускаються нагрітим катодом, надходять до аноду. При подальшому збільшенні потенціалу анода струм зростає, але вже не за експоненціальним законом, а в результаті ефекту Шотткі. Тому анодний струм у точці С приймають рівним струму насичення $I_{\text{нас}}$. При зміні температури катоду значення струму в точці С змінюється.

Наявність точки перегину С викликана як просторовим зарядом, що створюють емітовані електрони, так і неоднорідністю поверхні катода. Це вносить додаткову неточність при визначенні струму насичення в методі прямої Річардсона.

Використовуючи залежність на ділянці АВ (рис.1.4) і значення $I_{\text{нас}}$, можна визначити контактну різницю потенціалів $U_{\text{к.р.}}$. Для цього треба побудувати залежність $\ln J_a = f(U_a)$, подібну до наведеної на рис.1.5.

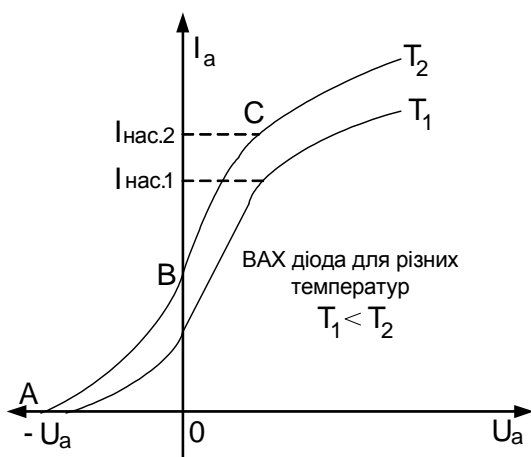


Рис.1.4.

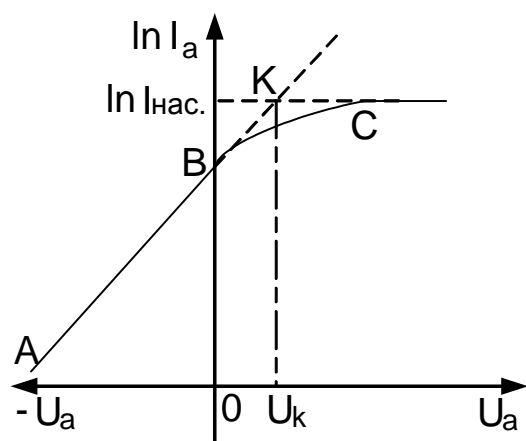


Рис.1.5.

Подовжимо залежність на ділянці АВ до перетину з рівнем $\ln I_{\text{нас}}$. Якби не існувало контактної різниці потенціалів між анодом і катодом, то точка перетину К перемістилася б на пряму $U_a = 0$. Тому абсциса точки К, узята зі зворотним

знаком, дорівнює значенню контактної різниці потенціалів між анодом і катодом:
 $U_{k.p.} = -U_k$.

Опис експериментальної установки

Будова робочої лампи наведена на рис. 1.6. У скляній колбі, де створений високий вакуум, на держаку-уводі закріплений циліндричний анод довжиною $l_a=27\text{мм}$ і катод у вигляді петлі з металеві нитки довжиною $l_n = 62\text{мм}$ і діаметром $d_k = 0,1\text{мм}$, що підтримується посередині пружиною від прогинання.

Анод виготовлений з нікелю, а нитка розжарювання (катод) - з металу з питомим електричним опором $\rho = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Для визначення термoeмісійних сталх рівняння Річардсона - Дешмана необхідно зібрати схему, наведену на рис.1.7.

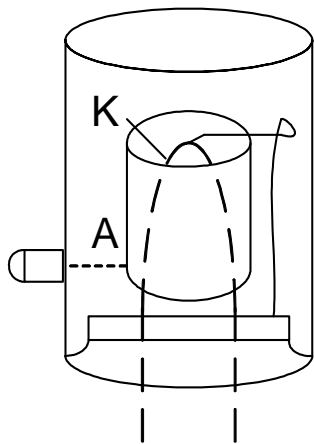


Рис.1.6.

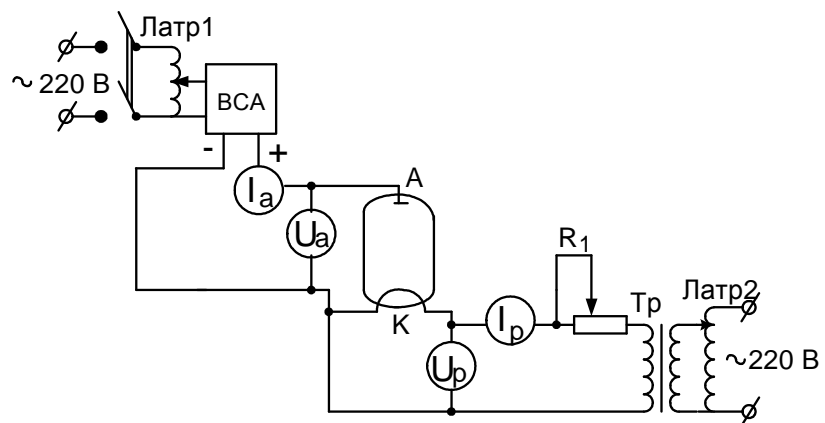


Рис.1.7.

Нитка розжарювання (катод) нагрівається електричним струмом. Через понижуючий трансформатор T_p напруга, що знімається з ЛАТРа2, подається на нитку розжарювання. Температура нагрівання залежить від величини струму розжарювання, який змінюється реостатом R_1 . Струм розжарювання I_n вимірюється амперметром, а напруга розжарювання - вольтметром U_n . До аноду лампи прикладена стала напруга від випрямляча ВСА. Значення цієї напруги можна змінювати за допомогою ЛАТРа1. Анодний струм вимірюється мікроамперметром, що має два діапазони вимірів: 500 мкА і 5 мА . Анодна напруга, що прикладена між анодом і катодом, вимірюється вольтметром U_a .

Для розрахунку температури нитки розжарювання використовуємо формулу (1.7), де її опір при $t = 0^\circ\text{C}$ розраховуємо з урахуванням розмірів за формулою

$$R_0 = \rho \frac{\ell_n}{S_n}, \quad (1.11)$$

де ρ і S_n - питомий електричний опір металу нитки розжарювання і площа її поперечного перерізу, відповідно.

Температурний коефіцієнт опору β у формулі (1.7) для металу нитки розжарювання дорівнює $\beta = 4,9 \cdot 10^{-3}$ град. $^{-1}$

Для побудови вольт-амперної характеристики в області АВ (рис. 1.4) збирають схему, наведену на рис.1.8.

Схема на рис.1.8 відрізняється від попередньої тим, що на анод подають не додатний потенціал, а від'ємний (зворотний), тобто затримуючий.

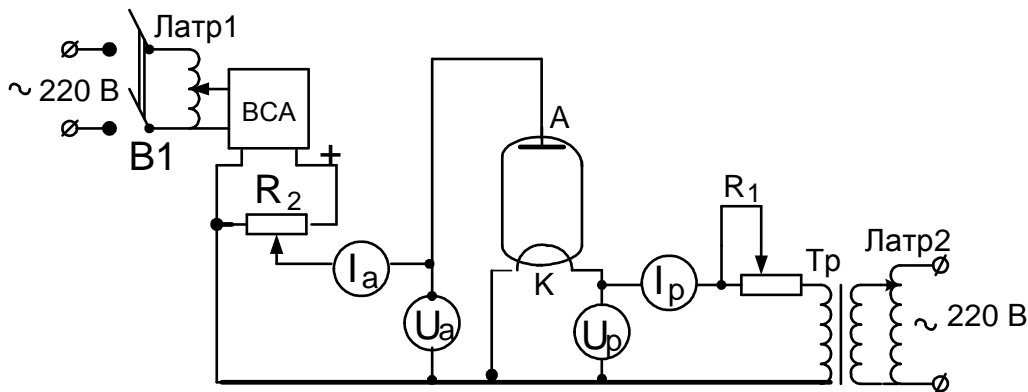


Рис.1.8.

Значення зворотної напруги регулюють потенціометром R_2 і вимірюють вольтметром $U_{a.звр.}$ з діапазоном виміру - 4 В. Анодний струм у цьому випадку вимірюють чутливим мікроамперметром з діапазоном вимірювання 5-10 мкА.

Завдання

1. Зняти дані вимірів I_a і U_a для декількох (4-5) значень струму розжарення і побудувати вольт-амперні характеристики лампи $I_a = f(U_a)$.

Для цього треба ознайомитися зі стендом лабораторної роботи, підключити до клем необхідні прилади. Повернути ручку регулятора напруги ЛАТРа 1 та 2 і потенціометра R_2 проти годинникової стрілки до упору. Напруга, що знімається з ЛАТРів, у цьому випадку дорівнюватиме нулю.

Після дозволу викладача увімкнути перемикач П1 і ручками регулятора напруги ЛАТРа 2 і реостата R_1 встановити перше значення струму розжарювання I_r , що складає 1,25 А, і виміряти відповідну до цього струму напругу розжарювання U_r .

2. Поставити перемикач полярності анодної напруги, що розміщений на стенді, в положення “ЗВОРОТНА НАПРУГА”. Відповідно до схеми рис.1.8 провести виміри I_a і U_a для побудови ділянки АВ вольт-амперної характеристики. При цьому ручка регулятора напруги ЛАТРа 1 **повинна бути увесь час у початковому положенні**. Обертаючи за годинниковою стрілкою ручку потенціометра R_2 , встановити різні значення від'ємної анодної напруги

(вольтметр на 4В) і виміряти відповідні величини анодного струму. Від'ємну напругу змінювати, доки анодний струм наблизиться приблизно до нуля. Результати вимірів занести у таблицю.

3. Перевести перемикач полярності анодної напруги у положення “ПРЯМА НАПРУГА”. Відповідно до схеми на рис.1.7 зробити виміри I_a і U_a для побудови ділянки ВС вольт-амперної характеристики. Обертаючи ручку регулятора напруги ЛАТРа1 встановити і потім виміряти різні значення анодної напруги і анодного струму (спочатку в діапазоні 500 мкА, а коли стрілка зашкалюватиме, переключити прилад на діапазон 5 мА). Результати вимірів занести в таблицю.

4. Повторити виміри відповідно до п. 1, 2 і 3 для інших значень струму розжарювання: 1,24А; 1,23А; 1,21А, фіксуючи відповідні значення напруги розжарювання.

5. За формулою (1.7) розрахувати значення температури, що відповідає встановленому струму розжарювання. При цьому слід урахувати опір дрітків, а величину опору R_t розрахувати на підставі закону Ома: $R_t = U_P / I_P$

6. Побудувати вольт-амперні характеристики і по точками перегину (точка С) визначити з графіків значення струму емісії (насичення) $I_{нас}$, що відповідають різним температурам катода T_1, T_2, \dots

7. Розрахувати густину струму емісії за формулою

$$j_e = \frac{I_{нас.}}{S}, \quad (1.12)$$

де S - площа поверхні катода.

8. За результатами попередніх розрахунків густини струмів емісії і відповідних їм температур побудувати залежність $\ln(j_e / T^2) = f(1/T)$ (див. рис.1.2).

9. Визначити константи A і ϵ_0 досліджуваного катода по відрізок, що відтинається на осі ординат, і нахилу прямої, відповідно. Значення ϵ_0 виразити у електрон-вольтах.

10. Для отриманих температур розжарювання провести розрахунок таких характеристик катода: $I_{нас}$ - струм насичення; τ - довговічність[с]; $\eta = I_{нас} / P_P$ - ефективність катода, ($P_P = I_P U_P$).

Довговічність вольфрамового катода визначається за формулою

$$\tau = \frac{0,1 \cdot d_k \cdot \gamma}{4\sigma_k}, \quad (1.13)$$

де γ - густина матеріалу катода [кг/м³], $\sigma_k = 4,38 \cdot 10^{-3} P_H \cdot \sqrt{\frac{\mu}{T}}$ - швидкість випару вольфрамової нитки розжарювання [кг/м²·с]; p_H - тиск насиченої пари вольфраму [Торр] – розрахувати за формулою $\lg p_H = A - B/T$, ($A=12,24$; $B=40,26 \cdot 10^{-3}$).

Дані розрахунків занести до таблиці.

11. Визначити контактну різницю потенціалів $U_{k.p.}$.

Методичні зауваження

1. Вимірювання необхідних величин для побудови вольт-амперних характеристик треба починати з низьких температур катода. Найбільше значення струму розжарювання не повинно перевищувати 1,30 А.

2. Перемикач полярності анодної напруги **не ставити в положення** “ЗВОРОТНА НАПРУГА”, якщо ручки регулятора напруги ЛАТРа 1 і потенціометра R2 не виведені проти годинникової стрілки до упору і анодна напруга не зменшилась до ~ 6 В.

3. Слід звернути увагу на те, що у формулі (1.12) S - площа поверхні катода, а не всієї нитки розжарювання.

4. При розрахунку температури катода слід мати на увазі, що до опору R_t додається ще опір з'єднувальних дротів $R_d = 0,34 \text{ Ом}$, а тому опір тільки нагрітого катода буде $R_{t,k} = R_t - 0,34$.

5. Побудову графіків виконати на міліметровому папері, а обчислення робити в одиницях СІ. Вольт-амперні характеристики можна будувати у напівлогарифмічному масштабі (див. Додаток 2).

6. У звіті вказати назву лабораторної роботи, привести схеми вимірів і результати у вигляді таблиць і графіків.

Контрольні запитання

1. Яка статистика і чому застосовується для опису стану електронів у металах? Проілюструвати пояснення.
2. Що називається рівнем Фермі?
3. Що таке потенційний бар'єр?
4. Написати і пояснити рівняння Річардсона - Дешмана.
5. Яке явище називають термоелектронною емісією?
6. Що таке робота виходу електрона? Одиниці її виміру.
7. У чому полягає метод прямої Річардсона, які його недоліки?
8. Як визначається температура катода в роботі і які недоліки виникають при цьому?
9. Що таке контактна різниця потенціалів, від чого вона залежить?
10. Від чого залежить довговічність катода?

Список літератури для самостійного вивчення

1. Капцов Н.А. Електроника (гл. III, § 1,4,5). - М.: ГЭИ, 1960.
2. Ворончев Т.А., Соколов В.Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш. шк., 1967.
3. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1977.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДНОГО КАТОДА МЕТОДОМ ФАУНДА

Мета роботи - визначення констант рівняння Тягунова з використанням методу Фаунда для знаходження струму термоелектронної емісії оксидного катода.

Поряд з металевими катодами, для яких робота виходу електрона достатньо велика (3-5eV), широкого застосування набули катоди з меншою роботою виходу, такі як торійовані (2,5 eV) і оксидні (1-1,2 eV). Оксидні катоди мають такі переваги у порівнянні з вольфрамовими:

- 1) меншу роботу виходу;
- 2) більш високу ефективність (відношення величини струму емісії до одиниці споживаної катодом потужності);
- 3) робоча температура оксидних катодів 1000-1100K, тоді як у вольфрамових - 2500 K;
- 4) густина струму емісії оксидного катода при робочій температурі складає 5000 А/м², тоді як у вольфрамового - всього 3000 А/м².

Оксидний катод можна вважати напівпровідником і густину струму термоелектронної емісії оксидного катода визначають за рівнянням Тягунова:

$$j_0 = B \sqrt{n_{\text{ва}}} \cdot T^4 e^{\frac{5}{kT} \frac{-\chi_3 - \frac{\theta}{2}}{2}},$$

де стала $B = A \sqrt{h^3 / 2} \cdot 1 / (2\pi m k)^{3/4}$; A - стала рівняння Річардсона - Дешмана; $n_{\text{ва}}$ - концентрація домішкових атомів; χ_3 - зовнішня робота виходу, рівна величині енергії, яку необхідно надати електрону, що знаходиться на дні зони провідності, щоб він залишив оксидний шар; θ - внутрішня робота виходу, рівна за величиною енергії, яка необхідна електрону, щоб перейти з домішкового рівня на дно зони провідності.

Сума $\chi_3 + \theta/2 = \chi_0$ - це ефективна робота виходу, тому рівняння Тягунова можна записати у вигляді:

$$j_0 = B' \cdot T^4 e^{\frac{5}{kT} \frac{-\chi_0}{2}}, \quad (2.1)$$

де $B' = B \cdot \sqrt{n_{\text{ва}}}$.

Теоретичний розрахунок константи B' і роботи виходу χ_0 виявляється неможливим, їх визначають експериментально.

Перенесемо в ліву частину рівняння (2.1) член $T^{5/4}$, а потім прологарифмуємо отримане рівняння:

$$\ln\left(\frac{j_0}{T^{5/4}}\right) = \ln B' - \frac{\chi_0}{kT}. \quad (2.2)$$

Можна бачити що рівняння (2.2), це залежність $\ln(j_0/T^{5/4}) = f(1/T)$, яка зображується прямою лінією (рис.2.1). Ця пряма відтинає на вертикальній осі відрізок, рівний $\ln B'$, і нахилена під кутом α , що визначається відношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = \chi_0/k, \quad (2.3)$$

де k - стала Больцмана.

Таким чином, визначення сталих термоелектронної емісії оксидного катода зводиться до вимірювань густини струму емісії катода при декількох значеннях температури і побудові прямої Річардсона.

Але при проведенні такого експерименту можуть з'явитися труднощі з визначенням струму емісії оксидного катода, тому що при робочій температурі оксидного катода не виникає насичення на вольт-амперній характеристиці з наступних причин:

1) **поперечний** опір оксида великий і при відбиранні електронів на ньому виникає різниця потенціалів (напруга), та виділяється значна потужність, що призводить до додаткового нагрівання катода і росту струму емісії;

2) на струм емісії оксидного катода сильно впливає зовнішнє електричне поле, що призводить до росту струму емісії (ефект Шоттки).

У зв'язку з вказаними труднощами на практиці струм емісії оксидних катодів вимірюють або методом недогартованих характеристик, або у імпульсних режимах, або **методом Фаунда**, тобто методом нульового поля.

Метод Фаунда дозволяє усунути вплив зовнішнього електричного поля на емісію оксидного катода. Для цього у двоелектродній вакуумній лампі між

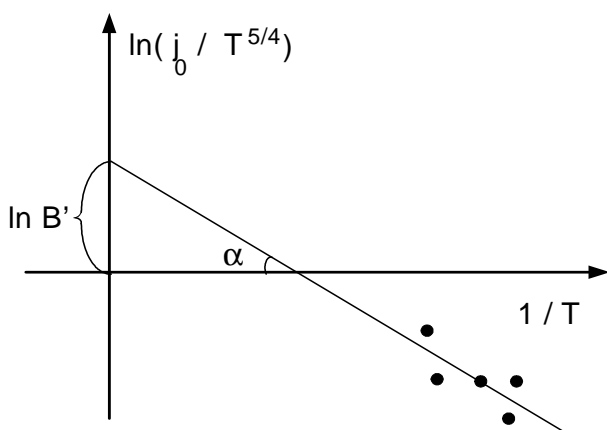


Рис. 2.1.

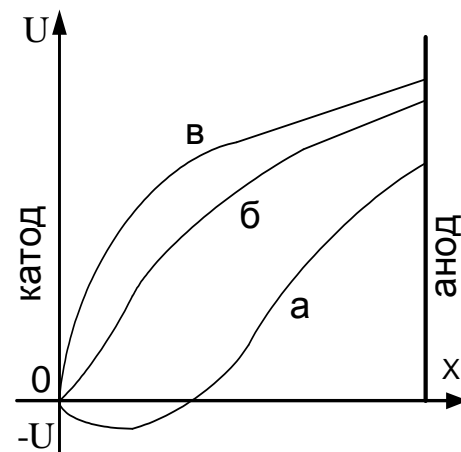


Рис. 2.2.

оксидним катодом і анодом розміщують допоміжний електрод.

Якщо до катода і анода прикласти не дуже велику напругу, то при деякій температурі не всі емітовані електрони долетять до анода, і поблизу катода буде

створюватися від'ємний просторовий заряд, що зменшує струм емісії. Розподіл потенціалу між катодом і анодом у цьому випадку має вигляд кривої (а) (рис.2.2)

Уявимо собі, що між допоміжним електродом і анодом запалили допоміжний розряд. Для цього досить нагріти допоміжний електрод, пропустивши через нього струм. При цьому в просторі між допоміжним електродом і анодом утвориться газова плазма, що і буде єдиним джерелом позитивних іонів, які електричним полем спрямовуються до оксидного катода. (Напруга між оксидним катодом і анодом має бути менше потенціалу іонізації газу, тоді електрони, що рухаються від оксидного катода на анод, не зможуть додатково іонізувати атоми газу).

Концентрація іонів змінюється зі зміною струму допоміжного розряду. Позитивні іони, що наближаються до оксидного катода, нейтралізують від'ємний просторовий заряд і, таким чином, зменшують гальмуюче поле, а тому електронний струм між катодом і анодом зростатиме (ділянка 1 на рис. 2.3.). При деякому значенні струму допоміжного розряду I_p гальмуюче поле стане рівним нулю і усі електрони, емітовані катодом, досягнуть до анода. Це відповідає точці А на рис.2.3. За точкою перегину залежності струму емісії I_e від струму допоміжного розряду I_p можна визначити справжній струм емісії оксидного катода I_{e0} , необхідний для побудови прямої Річардсона. У цьому випадку розподіл потенціалу зображується кривою (б) (рис.2.2).

При подальшому збільшенні струму допоміжного розряду біля катода створиться позитивний просторовий заряд, що призведе до росту струму емісії оксидного катода (ділянка II на кривій рис.2.3). Розподіл потенціалу за наявності позитивного просторового заряду показано кривою (в) на рис.2.2.

Опис експериментальної установки

Для визначення емісії оксидного катода використовують експериментальну лампу з додатковим електродом, будова якої подана на рис.2.4.

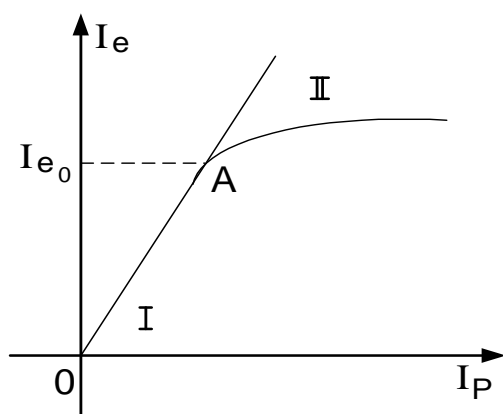


Рис.2.3.

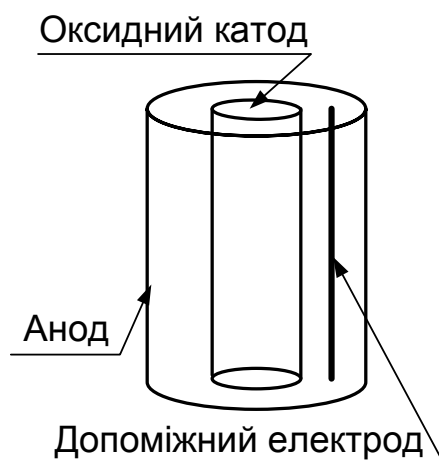


Рис.2.4.

Анод являє собою нікелевий циліндр висотою 3 см і діаметром 2,5 см. На осі анода знаходиться оксидний катод. Площа S робочої поверхні катода (з урахуванням оксидного покриття) складає $4,7 \text{ см}^2$. На відстані 6 мм від катода

паралельно до його осі вміщений допоміжний електрод - вольфрамовий дріт діаметром 0,18 мм.

Для виконання експерименту зібрана електрична схема (рис.2.5).

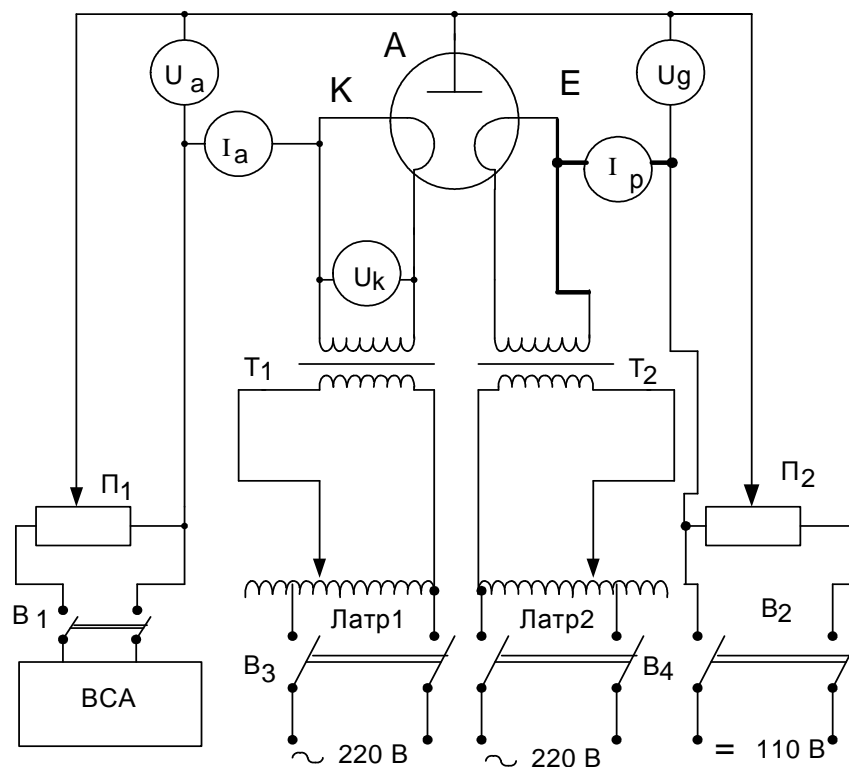


Рис. 2.5.

Завдання

1. Ознайомитися зі схемою рис.2.5 та зарисувати її у звіт і одержати дозвіл викладача на виконання вимірів.

2. Ручку ЛАТРа 1 повернути проти годинникової стрілки до упору і тільки потім поставити тумблер B_3 у положення - “РОЗЖАРЮВАННЯ КАТОДА”.

3. За допомогою ЛАТРа 1 встановити задану викладачем напругу розжарювання оксидного катода (за вольтметром U_k).

4. Увімкнути анодну напругу тумблером B_1 і за допомогою потенціометра Π_1 встановити анодну напругу $U_a = 4,5$ В.

5. Увімкнути тумблером B_2 постійну напругу, що подається до допоміжного електрода і анода, і потенціометром Π_2 встановити значення U_g , задане викладачем.

6. Ручку ЛАТРа 2 повернути проти годинникової стрілки до упору і тільки потім увімкнути тумблер B_4 “РОЗЖАРЮВАННЯ ДОПОМІЖНОГО ЕЛЕКТРОДА”. Поступово змінюючи ЛАТром 2 розрядний струм I_p від 0 до 2,5 мА, записати відповідні значення струму емісії оксидного катода I_e .

7. Повторити зняття залежності струму емісії оксидного катода I_e від струму допоміжного розряду I_p для трьох-чотирьох різних напруг розжарювання катода (за вказівкою викладача).

8. За побудованими залежностями $I_e = f(I_p)$ знайти відповідні значення I_{e0} струму емісії оксидного катода (див. рис.2.3).

9. Визначити густину струму емісії оксидного катода $j_e = I_e/S$, де S - площа робочої поверхні оксидного катода.

10. За графіком залежності температури оксидного катода від напруги розжарювання знайти значення відповідних температур катода.

11. За отриманим значенням I_{e0} , і T побудувати пряму Річардсона (див. рис.2.1).

12. Знайти значення роботи виходу оксидного катода χ_0 за формулою (2.3) і сталої B' (рис.2.1). Графік будувати на міліметровому папері.

Контрольні запитання

1. Які переваги мають оксидні катода?
2. Чому важко визначити струм насичення оксидного катода?
3. Які методи використовують для дослідження оксидних катодів і їх сутність?
4. Написати рівняння Тягунова і провести його аналіз.
5. Чим розрізняються торійовані і оксидні катода?
6. Технологія приготування торійованих катодів.
7. Технологія приготування оксидних катодів.
8. Оксидні катода прямого і непрямого розжарювання.
9. Що таке власна і домішкова провідність напівпровідників?
10. Дати визначення зовнішньої і внутрішньої роботи виходу електрона з оксидного катода.

Список літератури для самостійного вивчення

1. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш. шк., 1967.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Часть 2. - М.: Наука, 1973.

Лабораторна робота № 3

ЗНАХОДЖЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛІВ КАЛОРИМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи - експериментально знайти величину роботи виходу електрона з вольфраму методом компенсації охолодження металу.

Метали мають велику густину, а тому можна вважати, що валентні електрони атомів металу створюють електронний газ. Електронний газ утримується в металі полем позитивних іонів кристалічної ґратки.

Потенційна енергія електрона в цьому полі менша за потенційну енергію електрона поза металом, тому для видалення його за межі металу необхідно відповідну виконати роботу.

Можна вважати, що електрони металу знаходяться в потенційній ямі, просторові розміри якої відповідають розмірам тіла. Будемо вважати енергію електронів у металі ϵ від'ємною, а поза металом - додатною, тоді вищезгадане можна проілюструвати такою діаграмою розподілу енергії електронів на границі метал - вакуум (рис.3.1).

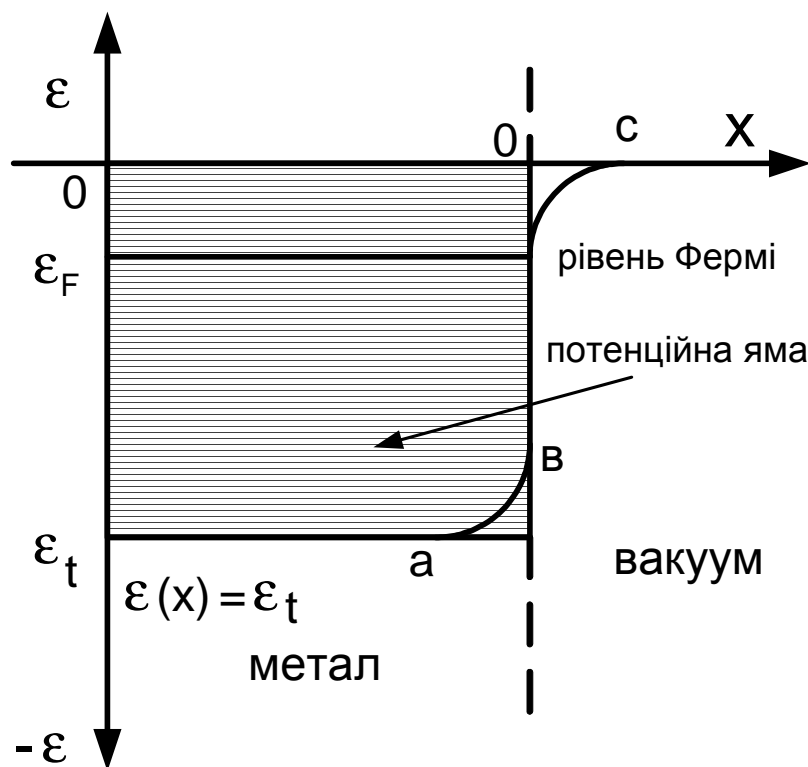


Рис. 3.1.

На відстані, більшій за 10^{-4} мм від границі метал-вакуум (область ліворуч від точки а), електрони мають найменшу енергію ϵ_t . Відстань 10^{-4} мм у тисячу разів більша за міжатомну. З наближенням до поверхні набуває ефективності вплив просторової неоднорідності поверхні металу, тому енергія електрона зростає аж до енергії виходу його з металу у вакуум (точка b). Однак на відстані $\sim 10^{-4}$ мм від поверхні металу (область між точками b і c) електрон ще не є вільним, тому що кристалічна ґратка металу ще впливає на нього. І тільки на відстані, що більше 10^{-4} мм від поверхні металу (область праворуч точки С), електрон можна вважати остаточно вільним – таким, що знаходиться у вакуумі.

Для видалення з об'єму металу електрона, розташованого на "дні" потенційної ями, необхідно виконати роботу по подоланню потенційного бар'єра ϵ_t , яку називають повною роботою виходу електрона.

У металах при абсолютному нулі температури електрони заповнюють всі енергетичні рівні від "дна" потенційної ями до рівня Фермі ϵ_F . Але для просунення електрона з енергією ϵ_F на відстань, де вплив металу на нього зневажливо малий, потрібно виконати меншу роботу - $\epsilon_0 = \epsilon_t - \epsilon_F$, що називається просто роботою виходу.

Таким чином з потенційної енергетичної ями можуть вилучатись електрони з енергіями як більше, так і менше фермівського рівня. Однак тільки при вилученні електронів з рівня Фермі не порушується термодинамічна рівновага у кристалі металу.

Для визначення роботи виходу електрона існує декілька методів. Один з них – метод компенсації охолодження металу, який ще називають калориметричним методом визначення роботи виходу електрона з металу.

Калориметричний метод визначення роботи виходу електрона

В основі калориметричного методу визначення роботи виходу електрона припускається, що емітовані металом електрони несуть із собою деяку частину енергії подібно до звичайного молекулярного випару речовини. Відомо, що при випаровуванні речовина охолоджується, тому катод, що випромінює електрони, повинен у результаті трохи прохолоннути. Більша частина енергії, що виноситься електроном, складається з роботи виходу ϵ_0 .

У роботі використовують вакуумну лампу-діод з вольфрамовим катодом прямого розжарювання (рис.3.2).

При нагріванні катода струмом розжарювання до визначеної температури виникає термоелектронна емісія. Число електронів, що залишають катод, і число електронів, що повертаються до катода з області від'ємного просторового заряду, буде рівним, а тому температура катода буде залишатися незмінною.

При замиканні ключа V_1 рівновагу буде порушено, тому що найбільш швидкі електрони, що залишають катод, досягнуть анода і створять анодний струм у анодному колі. У результаті відбудеться зниження температури катода.

Кожний швидкий електрон несе енергію, рівну роботі виходу ϵ_0 плюс його кінетичну енергію. Поза металом для описання руху електронів необхідно застосовувати статистику Максвелла - Больцмана, а тому середня енергія найбільш швидких електронів дорівнює $2kT$, де T - різниця між температурою

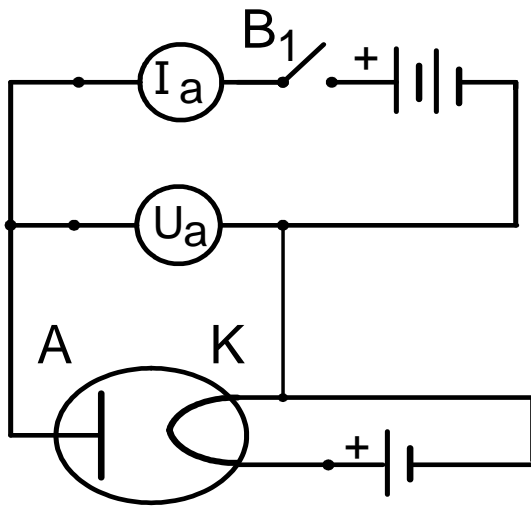


Рис. 3.2

катода T_k і температурою дроту T_0 , по якому електрони повертаються на катод; k - стала Больцмана.

Якщо струм, що протікає в анодному колі має величину I_a , то число електронів, що залишають катод і досягають анода за одиницю часу, дорівнює I_a/e ; e - заряд електрона. Отже, потужність, що виноситься електронами з катода, буде дорівнювати

$$\Delta P = \frac{I_a}{e} [\epsilon_0 + 2k(T_k - T_0)] \quad (3.1)$$

і у результаті втрати потужності температура катода знизиться.

Калориметричний метод полягає у вирівнюванні температури катода до початкової шляхом збільшення струму розжарювання на $I_{p'}$. У цьому разі потужність, що споживається катодом на розжарювання, зросте на

$$\Delta P' = (I_p + \Delta I_p)^2 R - I_p^2 R. \quad (3.2)$$

Нехтуючи значно малим членом $(R \Delta J_N^2)$, одержимо

$$\Delta P' = 2 \cdot R \cdot I_p \cdot \Delta I_p, \quad (3.3)$$

де R - опір нагрітого катода.

Температура охолодженого катода досягне початкової, якщо $\Delta P = \Delta P'$.

Таким чином отримаємо рівняння

$$\frac{I_a}{e} [\epsilon_0 + 2k(T_k - T_0)] = 2 \cdot R \cdot I_p \cdot \Delta I_p. \quad (3.4)$$

Звідси одержимо вираз для визначення роботи виходу електрона:

$$\epsilon_0 = \frac{2 \cdot R \cdot I_p \cdot \Delta I_p \cdot e}{I_a} - 2k(T_k - T_0). \quad (3.5)$$

Експериментальна установка і схема вимірювання

Щоб розрахувати значення роботи виходу електрона з металу катода, необхідно, згідно з виразом (3.5), знати значення опору нагрітого катода, струм розжарювання I_p і величину збільшення струму розжарювання ΔI_p , що потрібна для компенсації охолодження нитки при виникненні в колі анодного струму I_a .

Оскільки другий доданок у виразі (3.5) у 10-20 разів менше першого, то неточність у визначенні температури вносить незначну помилку в результат і різницю температур досить знати приблизно. Вважатимемо, що $T_k - T_0 = 700 \text{ K}$.

Значення ΔI_p і I_a треба знати точно. Тому в роботі застосовується спеціальна методика, що ґрунтується на використанні містка Уїтстона.

Схема вимірювань наведена на рис.3.3, де видно, що одним плечем містка Уїтстона є нитка розжарювання (катод) лампи, опір якої у нагрітому стані R , другим плечем є магазин опорів R_M , а третім і четвертим плечем містка є точно відомі опори $R_1 = 10 \text{ Ом}$ і $R_2 = 1000 \text{ Ом}$, відповідно.

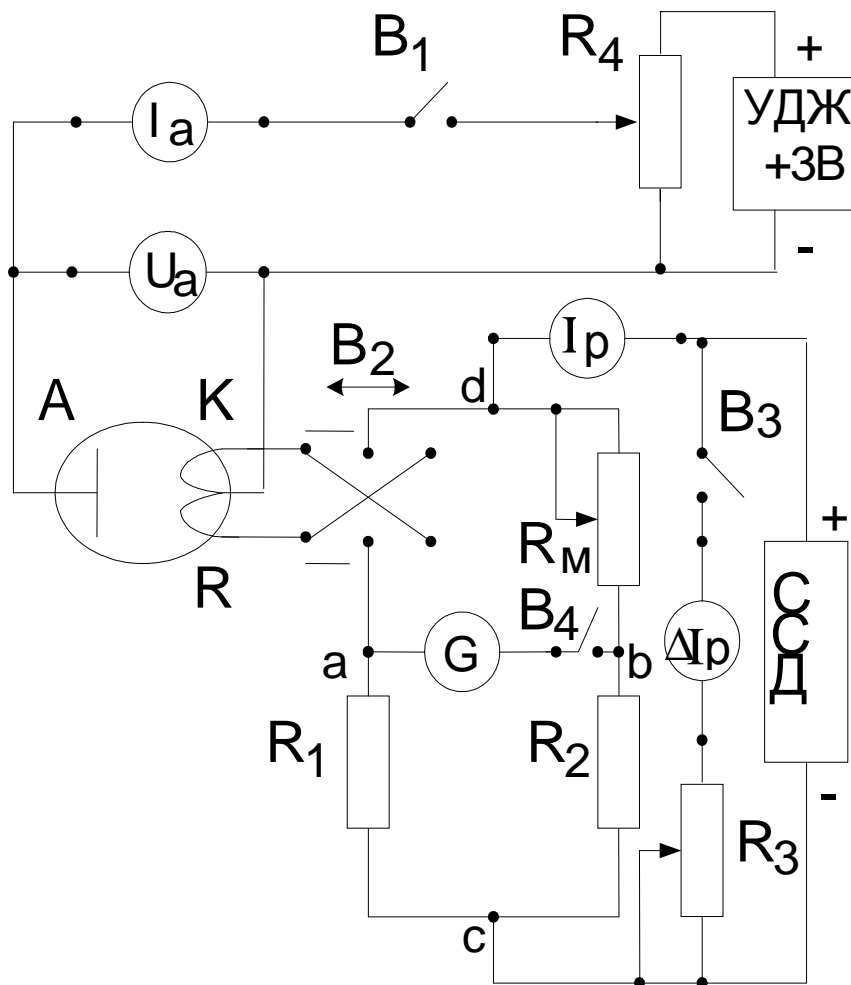


Рис. 3.3

Опори пліч містка Уїтстона можна підібрати так, що на діагоналі аб різниця потенціалів буде дорівнювати нулю, тобто включений у цю діагональ чутливий гальванометр показуватиме відсутність струму, тоді як до діагоналі cd прикладена різниця потенціалів від джерела живлення для нагріву катода. У цьому разі міст Уїтстона є зрівноваженим і умовою зрівноваження є $R \cdot R_2 = R_1 \cdot R_M$.

Використовуючи цю властивість, одержимо, що при проходженні струму, який нагріває нитку розжарювання лампи, міст буде зрівноваженим, тобто стрілка гальванометра G при замкнутій кнопці B_4 буде на нулі, якщо підберемо відповідний опір магазину. Тоді

$$R = \frac{R_1}{R_2} R_M. \quad (3.6)$$

При замкнутому ключі B_1 в анодному колі протікає струм I_a , що відповідає заданому струму розжарювання I_p . Коли ключ B_1 розімкнутий, електрони не відбираються від катода і його температура зростає. Отже збільшиться опір нитки розжарювання і порушиться рівновага містка.

Для зменшення опору нитки розжарювання треба зменшити струм розжарювання на величину ΔI_p . Це відбудеться, якщо замкнути ключ B_3 і реостатом R_4 домогтися рівноваги у містку Уїтстона. Тоді струм у колі з R_3 стане рівним ΔI_p .

При протіканні анодного струму на катоді виникає додаткове падіння напруги, не пов'язане зі струмом розжарювання, що вносить помилку у визначення рівноваги моста. Для запобігання цієї помилки використовується лампа з відводом від середини нитки. Змінюючи перемикачем B_2 напрямок струму розжарювання, будемо змінювати знак помилки, а роботу виходу визначимо як середнє значення результатів, отриманих при різних напрямках проходження струму розжарювання.

Завдання і порядок проведення роботи

Щоб знайти роботи виходу електрона потрібно виміряти струми ΔI_p , I_p і I_a та розрахувати величину опору R . Для цього необхідно:

1. Ознайомитися уважно зі схемою рис.3.2 і лабораторним стендом.
2. Повернути ручки потенціометрів R_3 і R_4 проти годинникової стрілки до упору, а в магазині опорів R_M встановити опір, рівний 5000 Ом.
3. Встановити перемикач B_2 у нижнє положення.
4. Увімкнути джерело стабільного струму (ДСС), переконатися, що світиться індикаторна лампа ЛН, і встановити струм I_p , заданий викладачем.
5. Підключити анодну напругу від універсального джерела живлення (УДЖ) і встановити потенціометром R_4 задане викладачем значення U_a .
6. Увімкнути ключ B_1 .

7. Натиснувши кнопку B_4 , шляхом підбору опору магазину $R_M \leq 5000 \text{ Ом}$, встановити стрілку гальванометра G на нуль шкали при його найбільшій чутливості. Записати підібране значення R_M .

8. Після зрівноваження моста записати встановлені значення I_a і I_p .

9. Розімкнути ключ B_1 . При цьому рівновага моста порушиться.

10. Увімкнути кнопку B_4 і ключ B_3 ; обертанням ручки реостата R_3 домогтися рівноваги у містку Уїтстона і знайти значення ΔI_p . Результати вимірів занести в таблицю, а ручку реостата R_3 поставити у початкове положення, тобто повернути проти годинникової стрілки до упору і розімкнути ключ B_3 .

11. За формулами (3.5) і (3.6) розрахувати значення R і ϵ_0 , відповідно.

12. Перевести перемикач B_2 у верхнє положення і повторити виміри за пп. 6-11. Потім знайти середнє значення ϵ_0 .

13. Встановити на ДСС інше значення I_p , задане викладачем, і повторити виміри, починаючи з п.6.

14. За отриманими середніми значеннями ϵ_0 визначити загальне середнє значення ϵ_0 . Усі результати звести у таблицю.

Методичні зауваження

При проведенні вимірювань треба стежити, щоб у магазині опорів завжди був увімкнений опір R_M **не менше** 4000 Ом, а ручка потенціометра R_3 завжди перед початком вимірів була виведена проти годинникової стрілки до упору, тому що в іншому випадку може зіпсуватись прилад для вимірювання ΔI_p .

Контрольні запитання

1. Які види емісій існують?
2. Як змінюється енергетичний потенціал в області границі метал – вакуум?
3. Як залежить струм термоелектронної емісії від температури катода?
4. У чому полягає метод компенсації охолодження нитки розжарювання?
5. Вивести основні розрахункові формули.
6. Для чого створений відвід від середини нитки розжарювання в експериментальній лампі?
7. Показати, чому дорівнює середня кінетична енергія швидких електронів.
8. Що таке місток Уїтстона?
9. Що значить зрівноважити місток Уїтстона?
10. Які існують методи вимірювання роботи виходу електрона з металів?
11. Поясніть роботу експериментальної схеми.
12. Які фактори впливають на точність визначення роботи виходу?
13. Як досягається вирівнювання температури катода?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи - вивчити закономірності тліючого розряду:

з'ясувати залежність ступеня покриття катода тліючим світінням від сили розрядного струму; експериментально перевірити закон подібності.

Чисті гази за своїми електричними властивостями відносяться до діелектриків, але штучно їх можна зробити провідниками.

Електричним розрядом називають явище проходження електричного струму в газах. Електричні розряди в газі розділяються на несамостійні та самостійні.

Несамостійним називається розряд, що потребує для його підтримки емісії електронів з катода або утворення зарядів у розрядному проміжку під дією зовнішніх факторів (таких, як нагрівання або опромінювання катода, чи іонізації газу в розрядному проміжку світлом, рентгенівським, радіоактивним випромінюванням, тощо).

Самостійним розрядом називається розряд, що не потребує для його підтримки дії зовнішніх іонізуючих факторів. При самостійному розряді генерація зарядів і їх рух у розрядному проміжку здійснюються виключно завдяки дії створеного між електродами - катодом і анодом електричного поля.

До самостійних розрядів відносять тліючий, дуговий, іскровий, коронний та інші розряди. Самостійні розряди не підлягають закону Ома і починаються тільки при відповідній напрузі, що прикладена до розрядного проміжку. Ця напруга називається напругою запалення газу, оскільки в газі виникає світіння, і її величина складає кілька сотень вольт. Напруга запалення залежить від форми і матеріалу електродів, стану газу та інших факторів.

Тліючий розряд спостерігається в газах з порівняно низькими тисками (1,33 - 1330 Па) і при великих напруженостях електричного поля (порядку декількох десятків тисяч вольт на метр).

Розряд супроводжується світінням газу, неоднаковим за яскравістю на різних ділянках розрядного проміжку. Світіння створюється випромінюванням збуджених молекул газу, а тому колір світіння залежить від виду газу. Так, наприклад, аргон дає рожеве світіння, неон – червоне, гелій – жовтувате, пара ртуті – зеленувато-блакитне а пара срібла – блакитне.

Виникнення різних за яскравістю областей обумовлюється різною енергією, яку отримують молекули газу при зіткненнях з прискореними електронами. Електрони, що емітуються катодом, прискорюються електричним полем і при зіткненнях з молекулами газу можуть іонізувати і збуджувати їх, а також рекомбінувати, як і іонізовані молекули. В розрядному проміжку, таким чином, одночасно постійно відбувається як збудження, іонізація, так і рекомбінація зарядів. Якщо енергії для самозабезпечення розряду буде

недостатньо, то процеси рекомбінації зарядів стануть переважними і розряд зникне.

На рис.4.1а схематично показано типовий розподіл світіння розряду між катодом і анодом. Розряд підрозділяється просторово на вісім областей: 1 - темний простір Астона; 2 - перше катодне світіння; 3 - темний (Круксів) катодний простір; 4 - друге катодне тліюче світіння; 5 - темний простір Фарадея; 6 - позитивний світний стовп; 7 - анодний темний простір; 8 - анодне світіння.

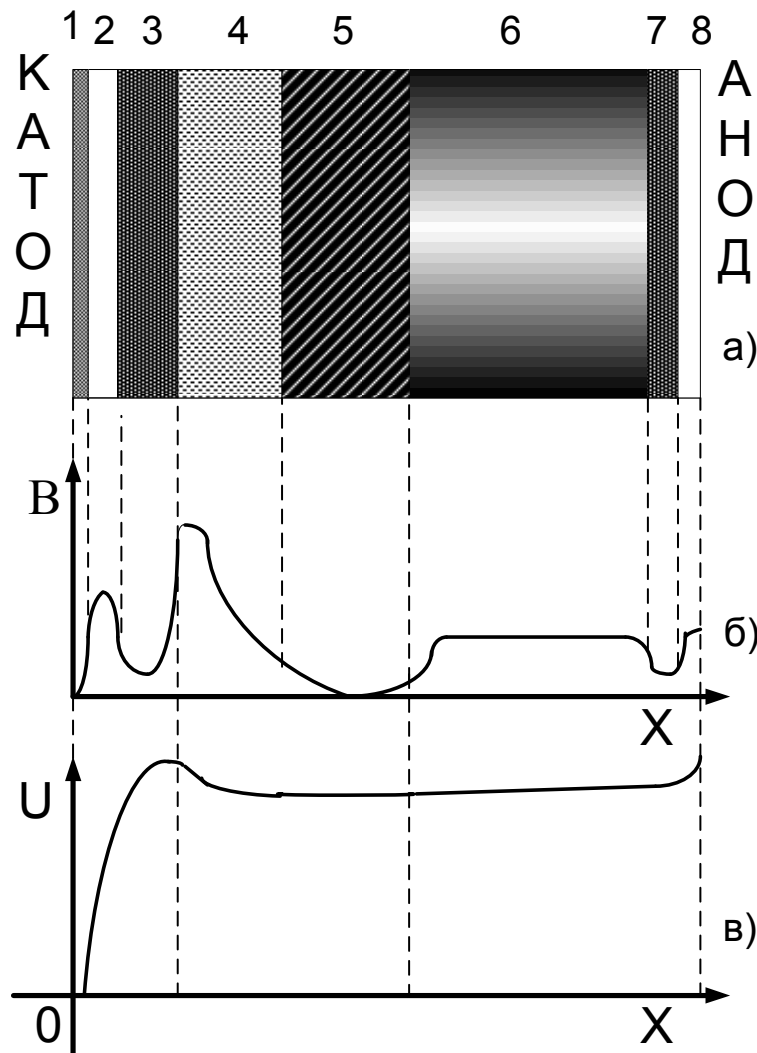


Рис. 4.1.

Для тліючого розряду характерним є те, що при зменшенні відстані між електродами зменшується лише довжина позитивного стовпа. Катодні області при цьому не змінюються, анодні ж можуть зникнути зовсім.

На рис.4.1,б зображена крива інтенсивності світіння різних областей розряду. Найбільш яскрава область - область катодного тліючого світіння.

Для пояснення процесу виникнення описаних темних і світлих прошарків газу в розряді необхідно розглянути криву розподілу потенціалу між електродами, зображену на рис.4.1,в. Характерним для вказаної залежності $U(x)$ є велике падіння потенціалу біля катода, тобто майже все падіння потенціалу між електродами розподілено лише на менше ніж $1/4$ області розряду. Це пояснюється особливістю розподілу просторового заряду в тліючому розряді. Внаслідок різної рухливості іонів і електронів біля катода концентрація іонів

значно перевищує концентрацію електронів. Через це поблизу катода виникає сильний просторовий додатний заряд, що і викликає появу катодного падіння потенціалу.

Одна з закономірностей тліючого розряду була вперше сформульована Гелем. **Законом Геля** стверджується, що величина площі поверхні катода, яка покрита світінням, пропорційна силі струму. Цей закон справедливий для невеликих сил струму, коли катод не повністю покритий світінням. При цьому, як показує досвід, значення катодного падіння потенціалу U і густина струму розряду j не залежать від сили струму I і залишаються незмінними.

Тліючий розряд, в якому при зміні сили струму розряду падіння потенціалу і густина струму залишаються незмінними, називається нормальним.

При збільшенні сили струму, коли вся поверхня катода покрита світінням, катодне падіння і густина струму розряду починають зростати. Такий режим тліючого розряду називають аномальним. Властивість катодного падіння потенціалу залишатися постійним при зміні струму в межах, що не призводять до переходу нормального тліючого розряду в аномальний, використовується в електронних стабілізаторах напруги (стабілівольт).

Важливою характеристикою тліючого розряду, як і будь-якого іншого самостійного розряду, є напруга його запалювання (виникнення світіння газу). Як показує експеримент, напруга запалювання U_3 газу залежить від добутку тиску p на відстань між електродами d : $U_3 = f(pd)$. Ця залежність, названа **законом Пашена**, має мінімум і показана на рис.4.2: 1 - для повітря; 2 - для неону.

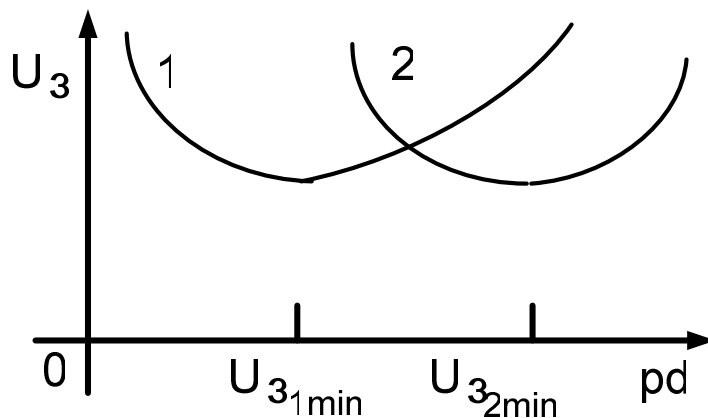


Рис. 4.2.

В газових розрядах справджується **закон подібності**: якщо в двох розрядних трубках з плоскими електродами і однаковим газом добутки тиску газу на відстань між електродами рівні, то і напруга запалювання в цих трубках буде одна й та ж, хоча значення p і d у них можуть розрізнитися.

Як видно з показаних залежностей, для кожного газу існує свій оптимальний добуток pd , що відповідає мінімальному значенню U_3 .

На значення U_3 впливає робота виходу електрона з катода і склад газу трубки. Можна так підібрати суміш газів, що напруга запалення розряду буде менше меншої з складових газів, або навпаки (закон Пеннінга).

Прилади і схема вимірів

Експерименти проводять на високовольтному стенді з напругою до 600 В, тому **КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** робити які-небудь переключення в схемі при увімкненому вимикачеві В2 і наявності напруги живлення.

Високовольтна установка (рис.4.3) складається з підвищувального трансформатора Т1, напівпровідникового випрямляча, згладжувального фільтра, що складається з дроселя Др і конденсатора С. Через вимикач В1 напруга подається на ЛАТР, за допомогою якого регулюється величина випрямленої напруги.

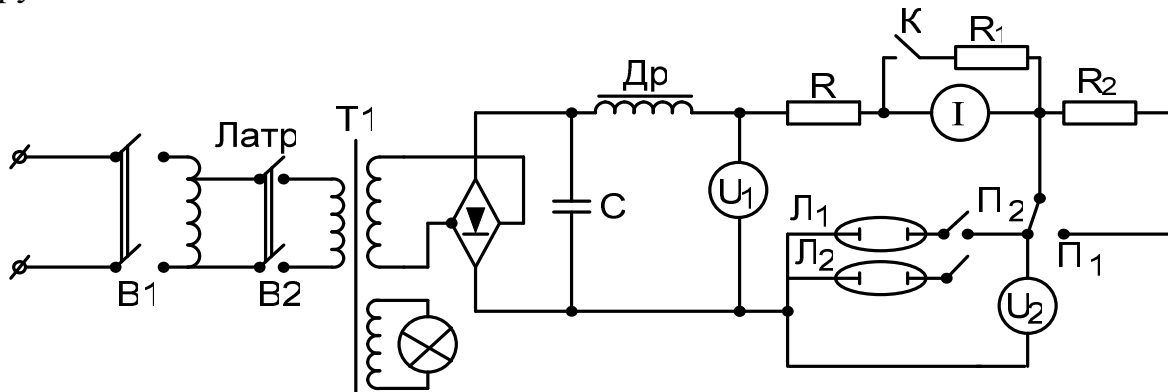


Рис.4.3.

Вимикач В2 подає напругу на високовольтний трансформатор. Напругу на виході випрямляча вимірюють вольтметром U_1 .

Дослідження для перевірки закону Геля виконують на двох розрядних лампах $Л_1$ і $Л_2$, заповнених аргеном до тиску 665 і 1330 Па. Катоди розрядних ламп нікелеві і мають на своїй поверхні риски, нанесені на відстані 5 мм одна від одної, що дозволяє виміряти площу, покриту світінням. Анодом служить рамка з нікелевого дроту.

Напругу між електродами розрядної лампи вимірюють вольтметром U_2 , струм, що проходить через лампу, міліамперметром. Переключення розрядних ламп виконують установкою у відповідне положення перемикача $П_2$.

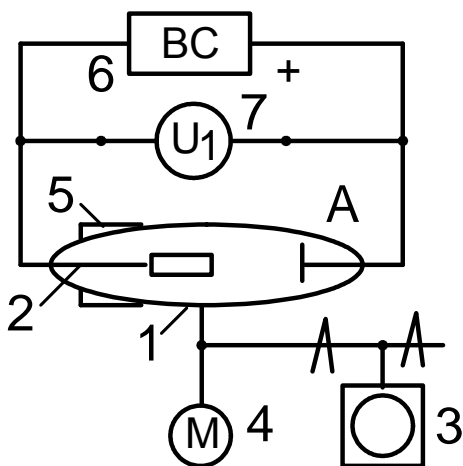


Рис.4.4

Перевірка закону подібності проводиться за схемою, що зображена на рис. 4.4.

Тиск, нижчий за атмосферний, у розрядній трубці 1 з рухомим електродом 2, створюється вакуумним насосом 3 і вимірюється манометром 4. Переміщення рухомого електроду здійснюється кільцевим магнітом 5. Живлення постійною напругою здійснюється високовольтним випрямлячем 6, а напруга запалення розряду вимірюється вольтметром 7.

Завдання

1. Зняти для розрядних ламп L_1 і L_2 залежності площі катода, покритої світінням, і падіння напруги від сили розрядного струму. Простежити вплив тиску наповнюючого газу на ці залежності. Перевірити, чи відповідають отримані експериментальні дані закону Геля. Побудувати графіки залежності густини струму на катоді і спадання напруги від величини розрядного струму.

2. Зняти залежність напруги запалювання U_3 від відстані між електродами і тиску повітря. Побудувати графік залежності $U_3 = f(pd)$ для повітря.

Зауваження до проведення експерименту

Перевірка закону Геля. Переконавшись у відсутності напруги на виході випрямляча (показання вольтметра U_1), підключити перемикачем П2 розрядну лампу L_1 (див.рис.4.3). Перемикач П1 встановити в положення мінімальної випрямленої напруги. Вимикачем В1 подати напругу на ЛАТР. Вимикачем В2 подати напругу на випрямляч. Діючи рукояткою ЛАТРа, збільшити напругу на розряді. Записати покази міліамперметра, вольтметра і значення площі катода, покритої світінням. Змінюючи ЛАТРОм струм у розрядній трубці через 2 мА, вимірювати відповідні кожному струму площі тліючого світіння на катоді і падіння напруги на розрядній лампі. Виміри продовжувати до повного покриття катода світінням. Повторити вимірювання для розрядної лампи L_2 . Закінчивши виміри, вимкнути випрямляч, переконавшись по нульовому положенні вольтметра. Дані вимірів занести до табл. 4.1.

Перевірка закону подібності і закону Пашена. Створити за допомогою вакуумного насоса у розрядній лампі тиск, нижчий за атмосферний. Перемістити рухомий електрод за допомогою кільцевого магніта на відстань 6 см від нерухомого. Діючи рукояткою ЛАТРа, збільшити напругу до виникнення розряду і виміряти напругу запалення U_3 . Зменшити напругу до нуля. Після зростання тиску в лампі в результаті натікання, зменшити відстань між електродами до 3 см і повторити вимірювання. Знову записати виміряні значення тиску і U_3 . Дані вимірів занести до таблиці. Провести 2-3 рази такі вимірювання, проаналізувати залежність $U_3 = f(pd)$ і побудувати криву.

Таблиця 4.1. - Результати перевірки закону Геля.

	$L_1(p_2 = \quad)$	$L_2(p_2 = \quad)$
$I_p, \text{ мА}$		
$S, \text{ см}^2$		
$j, (\text{мА/см}^2)$		
$U_2, \text{ В}$		

Контрольні запитання

1. Яка мета роботи?
2. Які розряди називаються самостійними і несамостійними?
3. Умови виникнення розряду?
4. Режими тліючого розряду?
5. Характерні риси тліючого розряду?
6. Проаналізувати області світіння в тліючому розряді?
7. Проаналізувати розподіл потенціалу між електродами в тліючому розряді та інтенсивність світіння між електродами?
8. Сформулювати закон Геля?
9. Сформулювати закон Пашена?
10. Сформулювати закон подібності?

Список літератури

1. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш. шк., 1967.
2. Капцов Н.А. Электрические явления в вакууме и газах. -М.: ГЭИ, 1960.

Лабораторная работа 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи – вивчення дугового розряду ртутно-кварцевої лампи типу ДРЛ-250 і дослідження її характеристик.

Якщо на холодні електроди (анод і катод) розрядної лампи, наповненої газом, подати, відповідно до схеми рис.5.1, постійну напругу, то в лампі виникне електричний розряд, характер якого залежить від величини струму. Протікання електричного струму через газ або пару називають розрядом, а залежність напруги на лампі від розрядного струму – статичною вольт-амперною характеристикою (ВАХ).

Величина струму, що протікає в розрядному проміжку (анод-катод), залежить від значення обмежуючого опору R . Зменшення цього опору приводить до зростання сили струму розряду (відрізок **d-e** на рис.5.2).

При певному значенні струму ($\sim 1A$), що залежить від форми катода, матеріалу, з якого він виготовлений, тиску газу, аномальний тліючий розряд (відрізок **d-e** на рис.5.2) переходить у самостійний дуговий розряд (відрізок **f-g**). Відрізок **e-f** на вольт-амперній характеристиці має спадаючу залежність і відповідає перехідним процесам.

Коли струм розряду досягає значення порядку 1А, відбувається розігрів певної області на катоді, викликаний посиленням бомбардування катода іонами газу. Найбільш нагріта область на поверхні катода, з якої відбувається термоелектронна емісія, називається катодною плямою. Інтенсивне випромінювання електронів з області катодної плями призводить до того, що переважною стає термоелектронна емісія, а не γ - процеси. У результаті цього електричний розряд з аномального тліючого перетворюється в самостійний дуговий. Повне падіння напруги на розрядному проміжку складається із суми катодного падіння, падіння напруги на позитивному стовпі дуги і падіння в області анода. На рис.5.3

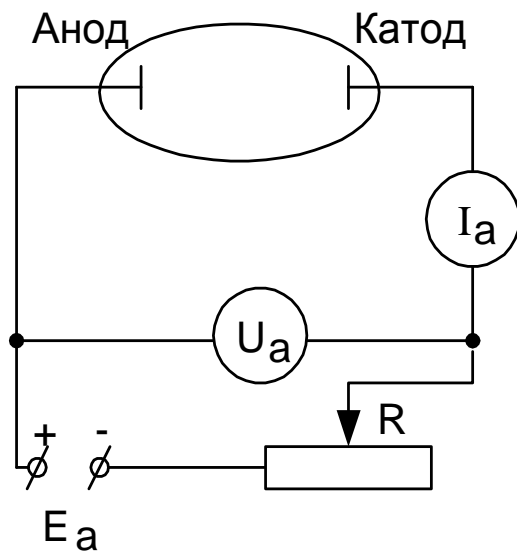


Рис.5.1

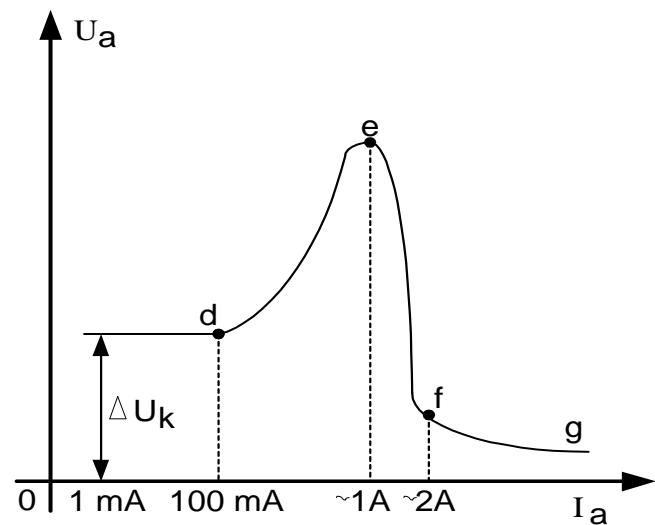


Рис.5.2

наведено розподіл потенціалу між електродами лампи при дуговому розряді. Безпосередньо перед катодом спостерігається катодне падіння потенціалу. На відміну від тліючого розряду довжина катодного падіння при дуговому розряді дорівнює величині середньої довжини вільного пробігу електрона. Величина катодного падіння U_k приблизно дорівнює потенціалу іонізації U_i газу, в якому спостерігається розряд, що значно менше, ніж при тліючому розряді.

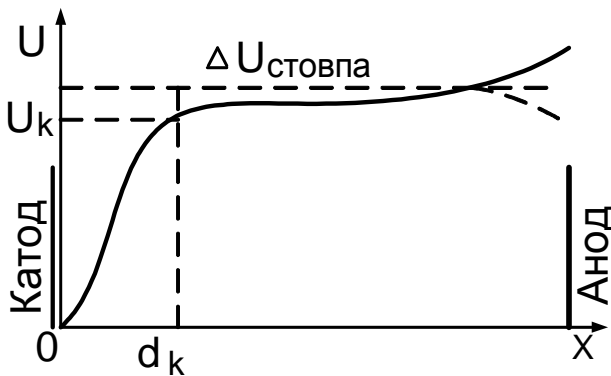


Рис.5.3

Майже весь розрядний проміжок займає позитивний стовп дугового розряду. Однак падіння напруги на ньому незначне. На відміну від тліючого розряду тут більше густина струму.

Дуговий розряд існує як при низькому (~ 100 Па), так і при високому ($\sim 10^5$ Па) і надвисокому тисках. При дуговому розряді катод і анод

нагріваються до високої температури. Залежно від температури, форми і матеріалу анода в області анода може спостерігатися як збільшення падіння

напруги (додатне анодне спадання напруги), так і зменшення (від'ємне анодне спадання напруги). Однак прианодне падіння напруги може бути відсутнім (горизонтальний відрізок на рис.5.3).

Від температури катода сильно залежить густина струму емісії. Тому, змінюючи величину відводу тепла від розрядної лампи, можна змінювати величину номінального струму, тобто при додатковому охолодженні лампи можна значно підвищити допустимий струм розряду.

Баластовий опір R (рис.5.1) обмежує значення струму розряду, підтримуваного зовнішнім джерелом електрорушійної сили (ЕРС). При збільшенні баластового опору R і незмінному діючому значенні напруги зовнішнього джерела живлення може настати момент, коли дуговий розряд не запалиться. Найбільше значення опору R , при якому дуговий розряд ще можливий, називають критичним $R_{кр}$. При цьому значення струм розряду буде найменшим $I_a = I_{a \min}$. Якщо необмежено зменшувати значення опору баласту R , то відбудеться таке збільшення розрядного струму, що приведе до пошкодження лампи. Номінальне значення баластового опору, що визначає величину робочого струму лампи, розраховують на основі балансу теплової енергії на катоді.

Залежність між падінням напруги на лампі, струмом розряду, значенням баластового опору і діючою ЕРС живлення E_a називають навантажувальною характеристикою лампи. Вона виражається рівнянням

$$U_a = E_a - I_a \cdot R. \quad (5.1)$$

Графічно це є рівняння прямої лінії з від'ємним нахилом (рис.5.4, 5.5).

Якщо пряма навантажувальної характеристики перетинає статистичну характеристику, то точка перетину показує величину можливого струму в даному ланцюзі. При значенні баластового опору R_1 дуговий розряд не спостерігається.

Збільшення розрядного струму призводить до того, що падіння напруги на позитивному стовпі зменшується, тому що зростає його провідність. Тому диференціальний опір дугового розряду $r_d = dU/dI$ є негативним, тобто $dU/dI < 0$.

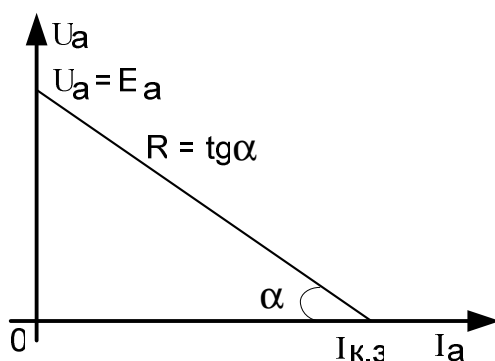


Рис. 5.4.

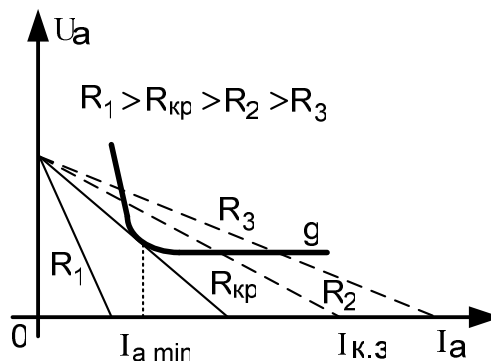


Рис. 5.5.

Оскільки відношення dU/dI визначає тангенс кута нахилу дотичної до статичної вольт-амперної характеристики, то, обчислюючи тангенс кута нахилу дотичної до кожної точки статичної вольт-амперної характеристики (тобто

виконуючи графічне диференціювання), можна побудувати залежність диференціального опору розряду від анодного струму.

Промислові дугові лампи працюють на змінному струмі з частотою 50 Гц. У цьому випадку електроди лампи називаються анодом і катодом умовно, тому що через половину періоду анод стає катодом, а катод - анодом.

Залежність миттєвих значень u_a падіння напруги на електродах лампи від миттєвих значень i_a розрядного струму називається динамічною вольт-амперною характеристикою розряду. Динамічна характеристика дугового розряду різко відрізняється від статичної. Вигляд динамічної характеристики можна одержати на екрані осцилографа як у явному вигляді, так і параметричному (в залежності від часу). Якщо подати на пластини 'У' осцилографа падіння потенціалу на лампі, а на пластини 'Х' значення струму в цей момент, то за період одержимо динамічну ВАХ дугового розряду (рис.5.6).

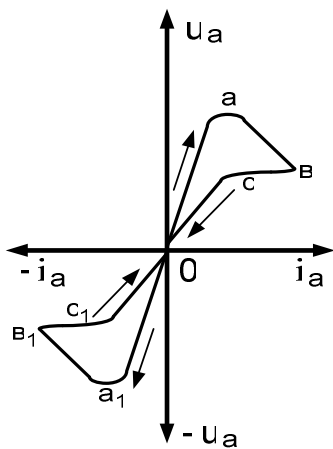


Рис. 5.6.

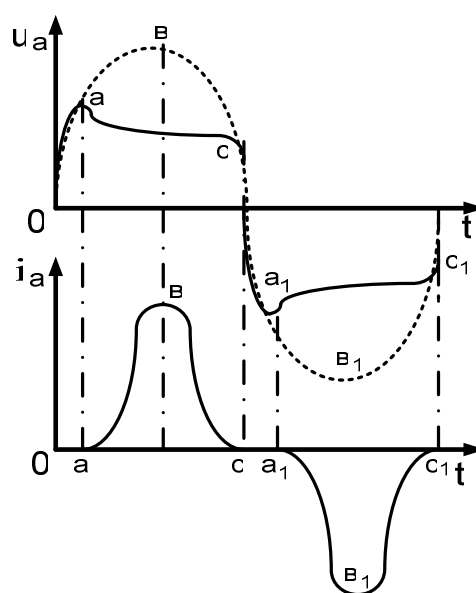


Рис. 5.7.

З підвищенням напруги зростає розрядний струм i в момент часу, що відповідає точці 'а', відбувається запалювання дуги. Останнє призводить до збільшення струму розряду і падінню напруги на електродах лампи, хоча ЕРС зовнішнього джерела збільшується (рис.5.7). Коли ЕРС зовнішнього джерела починає понижуватися, зменшується і струм розряду. У точці 'с' дуга гасне.

Після переходу напруги через нуль роль катода починає виконувати колишній анод і картина повторюється при протилежних знаках струму і напруги. Вигляд динамічної характеристики суттєво залежить від відстані між електродами, частоти струму живлення, значення баластового опору тощо.

Експериментальна установка і схема виміру

Для дослідження дугового розряду використовуємо лампу ДРЛ-250, підключену до мережі змінного струму за схемою, що наведена на рис.5.8 а; для дослідження параметричної динамічної характеристики $u_a = f(t)$ - на рис. 5.8 б;

параметричної динамічної характеристики $i_a = f(t)$ - на рис.5.8 в; явної динамічної характеристики $u_a = f(i_a)$ - на рис.5.8 г.

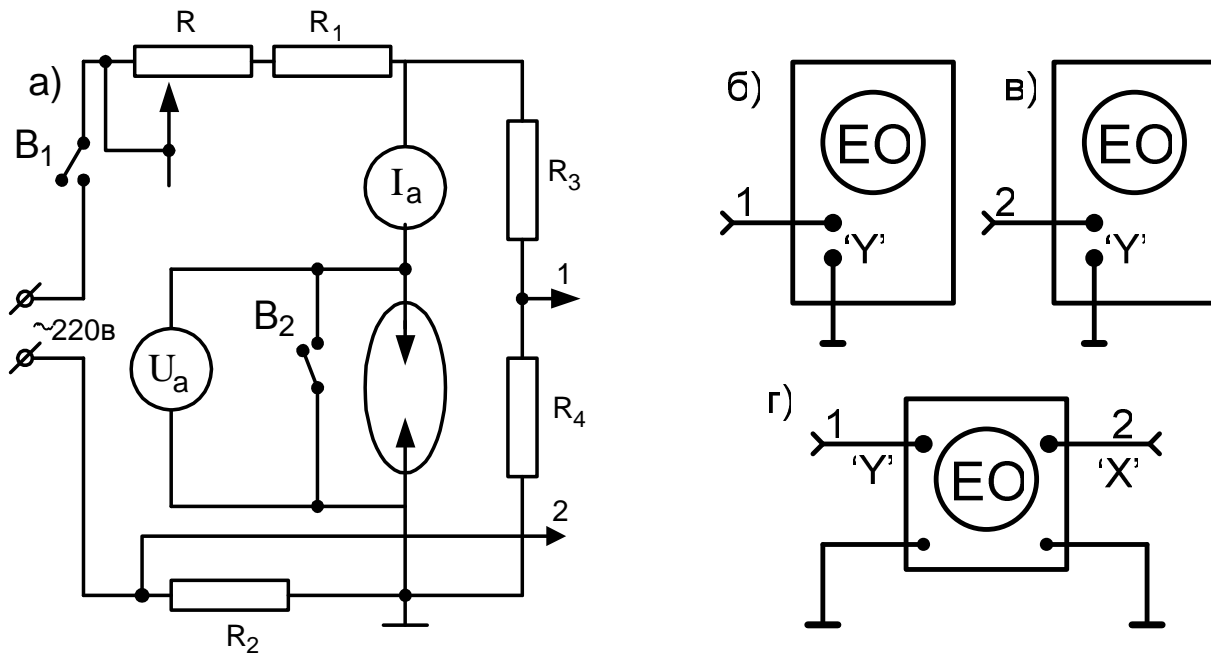


Рис. 5.8.

У пальнику лампи знаходиться аргон і пара ртуті, тому розряд відбувається в суміші пари ртуті з добавкою аргону. Аргон необхідний пониження напруги запалювання і забезпечення запалювання розряду при початковій температурі катода, коли тиск пари ртуті низький.

Лампа має однакові електроди у вигляді вольфрамового стержня, обмотаного спіраллю з вольфрамового дроту. Електроди активізуються спеціальною обробкою, що забезпечує високу емісійну здатність при їх розігріванні у процесі горіння дуги. Робочий струм лампи складає 2,2 А.

Для зняття падіння напруги u_a , що подається до входу осцилографа, застосовується високоомний подільник напруги, що складається з опорів R_3 і R_4 і підключений паралельно лампі. Для реєстрації явної динамічної ВАХ на вхід 'X' осцилографа подається напруга, пропорційна струму розряду, що знімається з опору R_2 . Опір реостата R і резистора R_1 складає в сумі величину баластового опору.

Для захисту від ультрафіолетового випромінювання лампа закрита захисним екраном. Охолодження лампи при необхідності здійснюється за допомогою обдування вмонтованим у стенді вентилятором.

Порядок виконання роботи

1. Установити найбільше значення опору реостата R і зробити ключем B_1 запалювання лампи.

2. Одержати на екрані осцилографа і перенести на кальку осцилограми струмів і напруги залежно від часу.

3. Одержати на екрані осцилографа і перенести на кальку осцилограму динамічної характеристики розряду.

4. Короткочасно натиснувши на кнопку B_2 , встановити значення струму короткого замикання лампи, необхідне для побудови навантажувальної характеристики.

5. Змінюючи від найбільшої величину опору реостата R , зняти статичну вольт-амперну характеристику дугового розряду і побудувати її на міліметровому папері.

6. Короткочасно натиснувши кнопку B_2 , знайти значення струму короткого замикання, необхідне для побудови навантажувальної характеристики при найменшому опорі реостата R .

7. Повторити виконання пункту 5 при обдуванні лампи. Порівняти величини найбільшого струму.

8. Шляхом графічного диференціювання побудованої статичної характеристики дугового розряду (без обдування), побудувати криву залежності диференціального опору лампи від величини розрядного струму.

9. Побудувати дві навантажувальні характеристики, що відповідають максимальному і мініимальному значенням опору реостата R . Побудову виконати на статичній вольт-амперній характеристиці дугового розряду без обдування.

Методичні зауваження

При знятті статичної вольт-амперної характеристики слід мати на увазі, що розряд внаслідок теплової інерційності встановлюється при кожному вимірі протягом однієї-трьох хвилин. При сталому розряді струм не змінюється.

Коли виконується побудова навантажувальної характеристики, значення E_a дорівнює напрузі мережі живлення, а значення струму визначається при замиканні кнопки B_2 . Дуга при цьому гасне і значення струму залежить тільки від величини баластового опору.

При роботі з осцилографом необхідно попередньо підготувати його до роботи. Для цього перемикач роду синхронізації поставити в положення 'ВІД МЕРЕЖІ'. Підібрати таке значення розгортки, щоб на екрані спостерігався один-два періоди коливань. Ручкою 'РІВЕНЬ СИНХРОНІЗАЦІЇ' підібрати таке положення, при якому зображення на екрані буде найбільш стійким. Надалі це положення не змінювати.

При визначенні залежностей $u_a(t)$ та $i_a(t)$ перемикач розгортки поставити в положення 'АВТОМАТИЧНА' і подільником, що на осцилографі, виставити необхідний розмір картини, а при дослідженні явної динамічної характеристики розгортка повинна бути відключена і сигнали відповідно до схеми подаються безпосередньо на відхиляючі пластини.

Осцилограми знімати на кальку, яку додати до звіту.

Контрольні запитання

1. Назвати основні відмінності тліючого розряду від дугового.
2. Які умови необхідні для виникнення дугового розряду?
3. Що таке динамічна вольт-амперна характеристика розряду?
4. Що називають катодною прямою?
5. Дати визначення катодного падіння напруги, назвати причини його виникнення.
6. Дати визначення і охарактеризувати γ -процеси.
7. Що таке термоелектронна емісія?
8. Дати визначення діючого значення струму чи напруги.
9. Пояснити вигляд осцилограм струму і напруги дугового розряду в залежності від часу.
10. Пояснити вигляд явної динамічної вольт-амперної характеристики розряду.
11. Від чого залежить величина анодного струму в газорозрядних приладах?
12. Що таке диференціальний опір дугової лампи, чому він від'ємний?
13. Чим обумовлене падіння напруги в області дугового розряду?
14. Пояснити, як розподілений потенціал уздовж розряду.
15. Що таке навантажувальна характеристика лампи?

Список літератури

1. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш. шк., 1967.
2. Капцов Н.А. Электрические явления в вакууме и газах. -М.: ГЭИ. 1960.

Список додаткової літератури до всього практикуму

1. Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света. – М.-Л.: Энергия, 1990.
2. Афанасьева Е.И., Скобелев В.М. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. - М.: Высш. шк., 1979.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. Радио, 1971.
5. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. - М.: Наука, 1971.
6. Пеннинг Ф.М. Электрические разряды в газах. - М.: ИЛ, 1960.
7. Специальный физический практикум. Под ред. Г.В. Спивака. - М.: МГУ, 1960.
8. Энгель А. и Штенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах, т.2. - М.: ОНТИ-НКТП, 1936.

Фізичні константи

• Стала Больцмана	$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град
• Заряд електрона	$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл
• Маса електрона	$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг
• Маса протона	$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
• Відношення маси протона до маси електрона	$m_p / m_e = 1836.5$
• Питомий заряд електрона	$e / m_e = 1.76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
• Стала Планка	$h = 6.22 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
• Швидкість світла у вакуумі	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
• Електрон-вольт у джоулях	$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж
• Стала Стефана – Больцмана	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м ² ·град ⁴
• Число Авогадро	$N_a = 6.02 \cdot 10^{26}$ 1/(К·моль)
• Універсальна газова стала	$R = 8.31 \cdot 10^3$ Дж/(К·моль·град)
• Тиск міліметр рт.ст. у паскалях	$1 \text{ мм.рт.ст.} = 1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Н/м}^2$
• Діелектрична проникність вакууму	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
• Магнітна проникність вакууму	$\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
• Абсолютний нуль температур	$T_{0 \text{ abs}} = 0 \text{ K} = -273 \text{ } ^\circ\text{C}$
• Коефіцієнт політропи для повітря	$\kappa = 1,2$

Таблиця 1 - Емісійні константи оксидних катодів

Вид катодів	ϵ , eV	B' , А/(см ² ·град ^{5/4})
Барій на окисленому вольфрамі	1,10	0,3
Нікель – ВаО– SrO	1,20	0,96
Торієво-оксидний катод	2,59	4,35
Барій-кисень-вольфрам	1,34	0,18

Таблиця 2 - Емісійні константи металів

Елемент	ϵ , eV	A , А/(см ² ·град ^{5/4})
Вольфрам (W)	4,50	60-100
Молібден (Mo)	4,37	115
Нікель (Ni)	4,84	30
Платина (Pt)	5,29	32
Торій (Th)	3,41	70
Цезій (Cs)	1,89	160

Таблиця 3 - Питомий опір і температурний коефіцієнт опору металів (при 20 °С)

Елемент	Питомий опір ρ , Ом./см	Температурний коефіцієнт опору α , 1/ °С
Вольфрам (W)	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Молібден (Mo)	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Нікель (Ni)	$10 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Залізо (Fe)	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 4 - Температура плавлення деяких металів

Елемент	t, °С
Вольфрам (W)	3416
Тантал (Ta)	2950
Титан (Ti)	1725
Нікель (Ni)	1452

Таблиця 5 - В'язкість газів (при 0 °С)

Газ	η , Па· °С
Азот (N ₂)	$1,67 \cdot 10^{-5}$
Водень (H ₂)	$0,93 \cdot 10^{-5}$
Повітря (без O ₂)	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Кисень (O ₂)	$1,92 \cdot 10^{-5}$
Вуглекислий газ(CO ₂)	$1,40 \cdot 10^{-5}$

З М І С Т

Стор.

Лабораторна робота № 1. Знаходження констант рівняння струму термоелектронної емісії металів	4
Лабораторна робота № 2. Дослідження емісії оксидного катода методом Фаунда	13
Лабораторна робота № 3. Знаходження роботи виходу електрона з металів калориметричним методом.....	18
Лабораторна робота № 4. Дослідження тліючого розряду.....	24
Лабораторна робота № 5. Дослідження дугового розряду.....	29
Список додаткової літератури до всього практикуму.	35
ДОДАТОК.	36

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «**Фізичні основи джерел світла**» (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Світлотехніка і джерела світла»).

Укладачі: Назаренко Леонід Андрійович,
Шепілко Євген Володимирович,
Петченко Гліб Олександрович

Редактор *М. З. Аляб'єв*

План 2008, поз. 24 М

Підп. до друку 26.08.2008 р.

Формат 60×84 1/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 2,3

Тираж 100 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 731 від 19.12.2001